

特開平11-326189

(43) 公開日 平成11年(1999)11月26日

(51) Int.Cl.⁸

識別記号

F I

G 0 1 N 21/23

G 0 1 N 21/23

G 0 2 B 1/02

G 0 2 B 1/02

5/30

5/30

審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願平10-97973

(22) 出願日 平成10年(1998) 4 月 9 日

(31) 優先権主張番号 特願平10-61779

(32) 優先日 平10(1998) 3 月12日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(71) 出願人 593217890

応用光研工業株式会社

東京都福生市大字熊川1642番地26

(72) 発明者 佐久間 繁

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72) 発明者 高野 修一

東京都福生市大字熊川1642番地26 応用光研工業株式会社内

(54) 【発明の名称】 光学素子、光学装置の光学系、光学素子の製造方法、光学素子の複屈折算出方法及び複屈折判定方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】複屈折の最小方向を選択できる光学素子の複屈折算出方法及び複屈折判定方法、複屈折が小さい光学素子、光学装置の収差が小さい光学系、複屈折が小さい光学素子の製造方法を提供する。

【解決手段】既知のピエゾ光学定数を任意の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数に変換し座標軸方向における屈折率変化量 Δn_1 と、座標軸方向に直交する方向における屈折率変化量 Δn_2 とを算出し、屈折率変化量 Δn_1 と屈折率変化量 Δn_2 との差より第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を任意の3次元直交座標系において求める光学素子又は光学素子用素材の複屈折量算出方法。

複屈折の値を予想するアルゴリズム

ピエゾ光学定数のデータをテンソル表記する

テンソルを座標変換
(ある軸のまわりの回転)

$a'_{11}-a'_{12}$ の大きさを判断する

複屈折の大きさを予想する

【特許請求の範囲】

【請求項1】 少なくとも、

光学素子または光学素子用素材を構成する光学材料にかかる既知のピエゾ光学定数（即ち、特定の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数）を任意の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数に変換する過程と、
前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子または光学素子用素材に付与する一軸応力と前記過程にて求めた任意の3次元座標系におけるピエゾ光学定数を用いて、前記座標軸方向（第1方向）に 10
おける屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを算出する過程と、
前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系において求める過程と、を有する光学素子または光学素子用素材の複屈折量算出方法。

【請求項2】 少なくとも、

光学素子または光学素子用素材を構成する光学材料にか 20
かる既知の弾性光学定数（即ち、特定の3次元直交座標系における弾性光学定数）を任意の3次元直交座標系における弾性光学定数に変換する過程と、
前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子または光学素子用素材に付与する一軸応力に対応する歪みと前記過程にて求めた任意の3次元座標系における弾性光学定数を用いて、前記座標軸方向（第1方向）における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを求める過程と、
前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系において求める過程と、を有する光学素子または光学素子用素材の複屈折量算出方法。

【請求項3】 少なくとも、

光学素子または光学素子用素材を構成する光学材料にか 40
かる既知のピエゾ光学定数（即ち、特定の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数）を任意の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数に変換する過程と、
前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子または光学素子用素材に付与する一軸応力と前記過程にて求めた任意の3次元座標系におけるピエゾ光学定数を用いて、前記座標軸方向（第1方向）における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを算出する過程と、
前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直 50

交座標系においてそれぞれ求める過程と、

前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求めた複屈折の量から前記光学素子または光学素子用素材について、複屈折が最小となる観察方向（第3方向）を見いだす過程と、を有する光学素子または光学素子用素材の複屈折最小方向の判定方法。

【請求項4】 少なくとも、

光学素子または光学素子用素材を構成する光学材料にかかる既知の弾性光学定数（即ち、特定の3次元直交座標系における弾性光学定数）を任意の3次元直交座標系における弾性光学定数に変換する過程と、
前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子または光学素子用素材に付与する一軸応力に対応する歪みと前記過程にて求めた任意の3次元座標系における弾性光学定数を用いて、前記座標軸方向（第1方向）における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを求める過程と、
前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系において求める過程と、
前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求めた複屈折の量から前記光学素子または光学素子用素材について、複屈折が最小となる観察方向（第3方向）を見いだす過程と、を有する光学素子または光学素子用素材の複屈折最小方向の判定方法。

【請求項5】 少なくとも、

光学素子用素材を構成する光学材料にかかる既知のピエゾ光学定数（即ち、特定の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数）を任意の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数に変換する過程と、
前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子用素材に付与する一軸応力と前記過程にて求めた任意の3次元座標系におけるピエゾ光学定数を用いて、前記座標軸方向（第1方向）における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを算出する過程と、
前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求める過程と、
前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求めた複屈折の量から前記光学素子用素材について、複屈折が最小となる観察方向（第3方向）を見いだす過程と、
前記複屈折が最小となる観察方向が光軸方向と一致（または略一致）するように、前記光学素子用素材を加工する過程と、を有する光学素子の製造方法。

【請求項6】 少なくとも、

光学素子用素材を構成する光学材料にかかる既知の弾性

光学定数（即ち、特定の3次元直交座標系における弾性光学定数）を任意の3次元直交座標系における弾性光学定数に変換する過程と、

前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子用素材に付与する一軸応力に対応する歪みと前記過程にて求めた任意の3次元座標系における弾性光学定数を用いて、前記座標軸方向（第1方向）における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを求める過程と、

前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系において求める過程と、

前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求めた複屈折の量から前記光学素子用素材について、複屈折が最小となる観察方向（第3方向）を見いだす過程と、前記複屈折が最小となる観察方向が光軸方向と一致（または略一致）するように、前記光学素子用素材を加工して光学素子を作製する過程と、を有する光学素子の製造方法。

【請求項7】 前記光学素子または光学素子用素材の材料がフッ化物結晶であることを特徴とする請求項1～6のいずれかに記載の方法。

【請求項8】 前記フッ化物結晶がフッ化カルシウム、フッ化ストロンチウム、またはフッ化バリウムであることを特徴とする請求項7記載の方法。

【請求項9】 前記複屈折が最小となる観察方向（光軸方向）がフッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸方向に一致（または略一致）するか、或いはフッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向に一致（または略一致）することを特徴とする請求項7または8記載の方法。

【請求項10】 フッ化物結晶により構成される光学素子であり、光軸方向がフッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸方向に一致（または略一致）するか、或いはフッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向に一致（または略一致）する光学素子。

【請求項11】 同一屈折率の或いは異なる屈折率のフッ化物結晶材料を組み合わせて構成される光学装置の光学系であり、該光学系の光軸方向が前記フッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸の方向と一致（または略一致）するか、或いは前記フッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向と一致（または略一致）する光学装置の光学系。

【請求項12】 フッ化物結晶材料からなり、材料が同一の或いは異なる光学素子を組み合わせて構成される光学装置の光学系の光軸方向が前記フッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸の方向と一致（または略一致）するか、或いは前記フッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向と一致（または略一致）する光学装置の光学系を構成する光学素子。

【請求項13】 前記フッ化物結晶がフッ化カルシウム、フッ化ストロンチウム、またはフッ化バリウムであることを特徴とする請求項10～12のいずれかに記載の光学素子または光学系。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光学素子、光学装置（例えば、カメラ、顕微鏡、望遠鏡、ステッパ等）の光リソグラフィ装置の光学系、光学素子の製造方法、光学素子の複屈折算出方法及び複屈折判定方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】光学素子材料として使用されるフッ化物結晶（単結晶）のフッ化カルシウム、フッ化ストロンチウム、フッ化バリウムは、通常の光学ガラスに比べて屈折率が低く、かつ分散（屈折率の波長依存性）が小さいので、光学系の色収差補正を行う上で非常に有効である。

【0003】特に、フッ化カルシウムは入手が容易であり、直径 $\phi 150\text{mm}$ 以上の大口径の単結晶も入手可能である。これらのフッ化物結晶（単結晶）は等軸晶系に属し、光学的に等方体であるため、レンズ等の光学素子の材料として好適である。そして、これらの利点から、フッ化物結晶は、カメラレンズ、顕微鏡レンズ、望遠鏡レンズの材料として従来からよく用いられている。

【0004】ところで、複屈折とは、光（=電磁波）の偏光方向によって屈折率が異なる現象であり、通常は物質の単位長さを通過するときの光路差（レターションと呼ばれる）で表され、単位は nm/cm が用いられる。また、複屈折の別の表記方法として、ある偏光方向の光に対する屈折率 n_1 とそれに直交する偏光方向の光に対する屈折率 n_2 の差（ $n_1 - n_2$ ）として表すこともある。

【0005】さらに、物質に外力が働かない状態での屈折率 n_0 が、外力の影響を受けて屈折率が変化し、それが偏光方向に依存する場合には、屈折率の変化量を Δn_1 、 Δn_2 と表し、この変化量の差（ $\Delta n_1 - \Delta n_2$ ）をもって、複屈折と呼ぶこともある。なお、複屈折が歪（ひずみ）に起因している場合には、この複屈折のことを歪と呼ぶことも多い。また、等軸晶系の結晶は本来、複屈折を持たないが、電磁場や応力の影響により複屈折を持つことがある。

【0006】即ち、前記フッ化物結晶（単結晶）では、応力の影響により複屈折を生じ、例えば製造工程で発生する熱応力のために、現実には製造されるフッ化物結晶には少なからぬ複屈折が存在している。そして、その複屈折の値は小さくても、 5nm/cm 程度あり、 $\phi 100\text{mm}$ 以上のフッ化物結晶では、 10nm/cm 以上になることも珍しくない。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】そのため、フッ化物結

10

20

30

40

50

晶（単結晶）を用いた光学系の収差をできるだけ低減しようとしても、応力の影響によりフッ化物結晶が有する複屈折が障害となり、その結果、光学系について十分な光学性能が得られないという問題点があった。また、光学素子や光学系に用いるフッ化物結晶（単結晶）の複屈折を低減するために、フッ化物結晶の製造工程におけるアニール時間を極端に長くするなどの対策を採ると、納期が長期化し（生産性が低下し）、またコストが増大するという問題点があった。

【0008】本発明は、かかる問題点を鑑みてなされたものであり、光学素子における複屈折の最小方向を選択できる、光学素子の複屈折算出方法及び複屈折判定方法、複屈折が小さい光学素子、光学装置の収差が小さい光学系、複屈折が小さい光学素子の製造方法を提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】そのため、本発明は第一に「少なくとも、光学素子または光学素子用素材を構成する光学材料にかかる既知のピエゾ光学定数（即ち、特定の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数）を任意の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数に変換する過程と、前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子または光学素子用素材に付与する一軸応力と前記過程にて求めた任意の3次元座標系におけるピエゾ光学定数を用いて、前記座標軸方向（第1方向）における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを算出する過程と、前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系において求める過程と、を有する光学素子または光学素子用素材の複屈折量算出方法（請求項1）」を提供する。

【0010】また、本発明は第二に「少なくとも、光学素子または光学素子用素材を構成する光学材料にかかる既知の弾性光学定数（即ち、特定の3次元直交座標系における弾性光学定数）を任意の3次元直交座標系における弾性光学定数に変換する過程と、前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子または光学素子用素材に付与する一軸応力に対応する歪みと前記過程にて求めた任意の3次元座標系における弾性光学定数を用いて、前記座標軸方向（第1方向）における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを求める過程と、前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系において求める過程と、を有する光学素子または光学素子用素材の複屈折量算出方法（請求項2）」を提供する。

【0011】また、本発明は第三に「少なくとも、光学素子または光学素子用素材を構成する光学材料にかかる既知のピエゾ光学定数（即ち、特定の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数）を任意の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数に変換する過程と、前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子または光学素子用素材に付与する一軸応力と前記過程にて求めた任意の3次元座標系におけるピエゾ光学定数を用いて、前記座標軸方向（第1方向）における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを算出する過程と、前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求める過程と、前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求めた複屈折の量から前記光学素子または光学素子用素材について、複屈折が最小となる観察方向（第3方向）を見いだす過程と、を有する光学素子または光学素子用素材の複屈折最小方向の判定方法（請求項3）」を提供する。

【0012】また、本発明は第四に「少なくとも、光学素子または光学素子用素材を構成する光学材料にかかる既知の弾性光学定数（即ち、特定の3次元直交座標系における弾性光学定数）を任意の3次元直交座標系における弾性光学定数に変換する過程と、前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子または光学素子用素材に付与する一軸応力に対応する歪みと前記過程にて求めた任意の3次元座標系における弾性光学定数を用いて、前記座標軸方向（第1方向）における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを求める過程と、前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系において求める過程と、前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求めた複屈折の量から前記光学素子または光学素子用素材について、複屈折が最小となる観察方向（第3方向）を見いだす過程と、を有する光学素子または光学素子用素材の複屈折最小方向の判定方法（請求項4）」を提供する。

【0013】また、本発明は第五に「少なくとも、光学素子用素材を構成する光学材料にかかる既知のピエゾ光学定数（即ち、特定の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数）を任意の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数に変換する過程と、前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子用素材に付与する一軸応力と前記過程にて求めた任意の3次元座標系におけるピエゾ光学定数を用いて、前記座標軸方向（第1方向）における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを

算出する過程と、前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求める過程と、前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求めた複屈折の量から前記光学素子用素材について、複屈折が最小となる観察方向(第3方向)を見いだす過程と、前記複屈折が最小となる観察方向が光軸方向と一致(または略一致)するように、前記光学素子用素材を加工する過程と、を有する光学素子の製造方法(請求項5)」を提供する。

【0014】また、本発明は第六に「少なくとも、光学素子用素材を構成する光学材料にかかる既知の弾性光学定数(即ち、特定の3次元直交座標系における弾性光学定数)を任意の3次元直交座標系における弾性光学定数に変換する過程と、前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子用素材に付与する一軸応力に対応する歪みと前記過程にて求めた任意の3次元座標系における弾性光学定数を用いて、前記座標軸方向(第1方向)における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを求める過程と、前記屈折率変化量 Δn_1 と前記屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系において求める過程と、前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求めた複屈折の量から前記光学素子用素材について、複屈折が最小となる観察方向(第3方向)を見いだす過程と、前記複屈折が最小となる観察方向が光軸方向と一致(または略一致)するように、前記光学素子用素材を加工して光学素子を作製する過程と、を有する光学素子の製造方法(請求項6)」を提供する。

【0015】また、本発明は第七に「前記光学素子または光学素子用素材の材料がフッ化物結晶であることを特徴とする請求項1～6のいずれかに記載の方法(請求項7)」を提供する。また、本発明は第八に「前記フッ化物結晶がフッ化カルシウム、フッ化ストロンチウム、またはフッ化バリウムであることを特徴とする請求項7記載の方法(請求項8)」を提供する。

【0016】また、本発明は第九に「前記複屈折が最小となる観察方向(光軸方向)がフッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸方向に一致(または略一致)するか、或いはフッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向に一致(または略一致)することを特徴とする請求項7または8記載の方法(請求項9)」を提供する。また、本発明は第十に「フッ化物結晶により構成される光学素子であり、光軸方向がフッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸方向に一致(または略一致)するか、或いはフッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向に一致(または略一致)する光学素子(請求項10)」を提供する。

【0017】また、本発明は第十一に「同一屈折率の或いは異なる屈折率のフッ化物結晶材料を組み合わせる構成される光学装置の光学系であり、該光学系の光軸方向が前記フッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸の方向と一致(または略一致)するか、或いは前記フッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向と一致(または略一致)する光学装置の光学系(請求項11)」を提供する。

【0018】また、本発明は第十二に「フッ化物結晶材料からなり、材料が同一の或いは異なる光学素子を組み合わせる構成される光学装置の光学系の光軸方向が前記フッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸の方向と一致(または略一致)するか、或いは前記フッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向と一致(または略一致)する光学装置の光学系を構成する光学素子(請求項12)」を提供する。

【0019】また、本発明は第十三に「前記フッ化物結晶がフッ化カルシウム、フッ化ストロンチウム、またはフッ化バリウムであることを特徴とする請求項10～12のいずれかに記載の光学素子または光学系(請求項13)」を提供する。

【0020】

【発明の実施の形態】フッ化物結晶(単結晶)のような等軸晶系の結晶は光学的には立方体であり、結晶軸に対するどの方位から通る光に対しても、屈折率は本来同一であり、原理的には複屈折を生じないはずであるが、機械的(力学的)な性質は異方性を有するため、同じ応力でも変位量は方位によって変わり、その結果、複屈折が発生することに本発明者らは着目した。

【0021】そして、本発明者らは、応力による複屈折は変位量(歪)と密接に関連するであろうから、複屈折も方位に依存することを予測し、物性テンソルを鋭意計算することで、その事実を確認することができた。具体的に言うと、本発明(請求項1～4)においては、光学素子または光学素子用素材を構成する光学材料にかかる既知のピエゾ光学定数または弾性光学定数(特定の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数または弾性光学定数)を座標変換して求めた任意の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数または弾性光学定数と、前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向に沿って前記光学素子または光学素子用素材に付与する一軸応力または対応する歪みとを用いて、前記座標軸方向(第1方向)における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを算出してその差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系において求めている。

【0022】そのため、本発明(請求項1～4)によれば、光学素子または光学素子用素材における複屈折の最小方向を選択できる。そして、本発明(請求項1～4)によれば、光学素子または光学素子用素材における複屈折の最小方向を選択して、収差の小さい(最小の)光学

系を光学素子により構成するか、或いは複屈折の小さい（複屈折が最小となるように光軸方向を設定した）光学素子を光学素子用素材から得ることができる。

【0023】また、本発明（請求項5、6）によれば、前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求めた複屈折の量から前記光学素子用素材について、複屈折が最小となる観察方向（第3方向）を見いだして、複屈折が最小となる観察方向が光軸方向と一致（または略一致）するように、前記光学素子用素材を加工することで光学素子を製造している。

【0024】そのため、本発明（請求項5、6）によれば、複屈折の小さい（複屈折が最小となるように光軸方向を設定した）光学素子を得ることができる。また、本発明にかかる光学素子または光学素子用素材の材料としては、光学系の色収差補正を行う上で非常に有効であるフッ化物結晶（単結晶）が好ましい（請求項7）。

【0025】また、本発明にかかるフッ化物結晶（単結晶）としては例えば、フッ化カルシウム、フッ化ストロンチウム、またはフッ化バリウムを挙げることができる（請求項8、13）。光学素子または光学素子用素材の材料がフッ化物結晶（単結晶）である場合には、複屈折が最小となる観察方向（光軸方向）がフッ化物結晶の〈111〉軸方向に一致（または略一致）するか、或いはフッ化物結晶の{111}面と直交する方向に一致（または略一致）することとなる（請求項9）。

【0026】フッ化物結晶により構成される光学素子であり、光軸方向がフッ化物結晶の〈111〉軸方向に一致（または略一致）するか、或いはフッ化物結晶の{111}面と直交する方向に一致（または略一致）する本発明（請求項10）にかかる光学素子は、複屈折の小さい（複屈折が最小となるように光軸方向を設定した）光学素子である。

【0027】また、同一屈折率の或いは異なる屈折率のフッ化物結晶材料を組み合わせる構成される光学装置の光学系であり、該光学系の光軸方向が前記フッ化物結晶の〈111〉軸の方向と一致（または略一致）するか、或いは前記フッ化物結晶の{111}面と直交する方向と一致（または略一致）する光学装置の光学系（請求項11）は、収差の小さい（最小の）光学系である（図1参照）。

【0028】また、フッ化物結晶材料からなり、材料が同一の或いは異なる光学素子を組み合わせる構成される光学装置の光学系の光軸方向が前記フッ化物結晶の〈111〉軸の方向と一致（または略一致）するか、或いは前記フッ化物結晶の{111}面と直交する方向と一致（または略一致）する光学装置の光学系を構成する光学素子（請求項12）は、複屈折の小さい（複屈折が最小と

なるように光軸方向を設定した）光学素子である。

【0029】なお、本発明において、方向が一致（または略一致）するとは、角度のズレでおよそ5度以内を意味する。以下、本発明を実施例により更に具体的に説明するが、本発明はこの例に限定されるものではない。

【0030】

【実施例】フッ化物単結晶からなる物体（例えば、光学素子や光学素子作製用の素材等の光学部材）の屈折率楕円体を表す式を、下記の（1）式とする。

$$B_{ij} x_i x_j = 1 \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

ここで、 x_1, x_2, x_3 はそれぞれ互いに直交する座標軸（3次元直交座標系の各座標軸）を表す。

【0031】（1）式における係数 B_{ij} が物体に付加される応力により変化し、それに伴って屈折率も変化する。この変化量 ΔB_{ij} は応力 σ_{kl} と、ピエゾ光学定数（piezo-optical coefficients: q_{ijkl} ）と呼ばれるテンソルにより結びつけられる（式(2)参照）。なお、表記の便宜上、 $ijkl \rightarrow ij$ として式（2）を式（3）のように表記する。

$$\Delta B_{ij} = q_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2)$$

$$\Delta B_{ij} = q_{ij} \sigma_j \quad (3)$$

また、応力テンソルの替わりに、歪テンソル ϵ_{kl} を用いて標記することも可能であり（式(4)参照）、ここで p_{ijkl} は弾性光学定数（elasto-optical coefficients）と呼ばれる。

$$\Delta B_{ij} = p_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (4)$$

ところで、NBS TECHNICAL NOTE 993(1978)には、フッ化カルシウム(CaF_2)、フッ化バリウム(BaF_2)、フッ化ストロンチウム(SrF_2)のピエゾ光学定数がいくつかの波長に対して掲載されている。この定数は、座標軸を結晶格子の軸にとっているのので、例えば x_1 は[100]軸、 x_2 は[010]軸、 x_3 は[001]軸としてもよい。そこで、式（3）に前記ピエゾ光学定数と応力テンソルを入力すれば、屈折率楕円体の変形量が計算できる。

【0034】即ち、測定方向（観測方向または光路）が決まれば、複屈折量が求まることとなる。例えば、物体に付加される応力 p が[100]軸に沿った一軸応力とすると、応力テンソルは、

$$\sigma_1 = p, \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0 \quad \text{であり、}$$

$$\Delta B_1 = q_{11} p, \Delta B_2 = q_{21} p, \Delta B_3 = q_{31} p, \dots$$

となる。

【0035】一方、等軸晶系のピエゾ光学定数は、その対称性から、3つの定数で代表され、 q_{11}, q_{12}, q_{44} が異なる定数となる。テンソル形式で書けば、下記の式のようにになる。

【0036】

【数1】

$$q_{ij} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ q_{12} & q_{11} & q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ q_{12} & q_{12} & q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{44} \end{pmatrix}$$

【0037】ここで、測定方向を例えば[001]軸方向からとすれば、複屈折は、

$$\Delta n // - \Delta n = 1 / \sqrt{(\Delta B_1) - 1} / \sqrt{(\Delta B_2)} \\ = - (1/2) n^3 (q_{11} - q_{12}) p \quad (5)$$

となる。式(5)において、 $\Delta n //$ は応力方向に偏光する光に対する屈折率の変化量であり、 Δn は応力方向に直交する方向に偏光する光に対する屈折率の変化量である。

【0038】式(5)は、係数($q_{11} - q_{12}$)が大きな物質(物体)ほど、同じ応力状態において大きな複屈折を生じることを示している。NBS TECHNICAL NOTE 993からピエゾ光学定数を書き出すと、波長637.8nmにおいて表1のようになる。

【0039】

【表1】

表1 ピエゾ光学定数

	CaF2	SrF2	BaF2
q_{11}	-0.38	-0.64	-0.99
q_{12}	1.08	1.45	2.07
$q_{11} - q_{12}$	-1.46	-2.08	-3.06
q_{44}	0.71	0.60	0.95

(10^{-12} Pa^{-1})

【0040】このように、3次元(x_1 : [100]軸、 x_2 : [010]軸、 x_3 : [001]軸)直交座標系の一つの座標軸(x_1 : [100]軸)方向に沿って光学素子用素材に付与する一軸応力 p のテンソルと、前記既知のピエゾ光学定数(特定の3次元直交座標系 x_1 、 x_2 、 x_3)のテンソルを用いて、前記座標軸方向(第1方向、[100]軸方向)における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向([010]軸方向)における屈折率変化量 Δn_2 とを算出し、さらに屈折率変化量 Δn_1 と屈折率変化量 Δn_2 との差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向([001]軸)からみた複屈折の量を求めることができる。

【0041】次に本発明者らは、通常の円盤形状の光学部材(例えば光学素子または光学素子作製用の素材)においては、光学系の光軸は円盤の中心軸の方向であり、応力の方向はそれに垂直で円盤の中心に向かう(または中心から外へ向かう: この方向を通常正とし、従って引っ張り応力の符号が正となる)場合が一般的であると考えた。

【0042】かかる円盤形状の光学部材について、任意方向に応力を加えた場合の複屈折を計算するには、前記既知のピエゾ光学定数を座標変換する必要がある。即

ち、前記既知のピエゾ光学定数は、特定の3次元(x_1 : [100]軸、 x_2 : [010]軸、 x_3 : [001]軸)直交座標系における光学定数であり、座標軸を結晶格子の軸にとった場合の値であり、前記応力を加える任意方向に対応する任意の3次元直交座標系におけるピエゾ光学定数は、前記既知のピエゾ光学定数を座標変換して求める必要がある。

【0043】そして、前記任意の3次元直交座標系の一つの座標軸方向(第1方向)に沿って前記光学部材に付与する一軸応力と前記任意の3次元座標系におけるピエゾ光学定数を用いて、一軸応力を付与する座標軸方向(第1方向)における屈折率変化量 Δn_1 と、前記座標軸方向に直交する第2方向における屈折率変化量 Δn_2 とを算出して、その差を求めることにより、前記第1方向及び第2方向に直交する第3方向からみた複屈折の量を前記任意の3次元直交座標系において求めることができる(図3参照)。

【0044】そこで、一軸応力を付与する方向を任意方向としたときの各複屈折を、言い換えると、任意の3次元直交座標系における各複屈折を本発明者らが計算した結果、光学部材を構成するフッ化物結晶の<111>軸方向から測定した複屈折がもっとも小さいことがわかった。

30

40

50

ここで、3次元 (x_1' 軸、 x_2' 軸、 x_3' 軸) 直交座標系における x_3' 軸が $[111]$ 軸方向を向く座標系におけるピエゾ光学定数は、前記既知のピエゾ光学定数を x_3 軸が $[111]$ 軸方向を向くように座標変換をすることにより求めた。

【0045】なお、ピエゾ光学定数の座標変換は、下記

$$q'_{ijkl} = a_{im} a_{jn} a_{ko} a_{lp} q_{mnop}$$

の式(6)に従って、テンソルの各成分を変換することで実施できる。この座標変換のためには、座標軸の周りの回転を行えばよい。

【0046】

【数2】

(6)

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} \cos(A) & \sin(A) & 0 \\ -\sin(A) & \cos(A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

【0047】上式において、 a_{ij} は座標変換を行うテンソルで、 x_3 軸の周りに A ラジアンだけ反時計回りに回転させたときの表示である。例えば、3次元 (x_1 : $[100]$ 軸、 x_2 : $[010]$ 軸、 x_3 : $[001]$ 軸) 直交座標系における x_3 軸を $[111]$ 軸方向に向けるためには、最初に x_3 軸の周りに45度 (反時計方向) 回転させ、次に x_2' 軸の周りに $\arctan(\sqrt{2})$ だけ時計方向に回転させればよい (図2)。

【0048】また、3次元 (x_1 : $[100]$ 軸、 x_2 : $[010]$ 軸、 x_3 : $[001]$ 軸) 直交座標系における x_3 軸を $[100]$ 軸方向に向けるためには、 x_2 軸の周りに45度 (反時計方向) 回転させればよい。また、3次元 (x_1 : $[100]$ 軸、 x_2 : $[010]$ 軸、 x_3 : $[001]$ 軸) 直交座標系における x_3 軸を $[11$

0] 軸方向に向けるためには、最初に x_2 軸の周りに90度 (反時計方向) 回転させ、次に x_3 軸の周りに45度 (反時計方向) 回転させればよい。

【0049】ここで、3次元 (x_1 : $[100]$ 軸、 x_2 : $[010]$ 軸、 x_3 : $[001]$ 軸) 直交座標系における x_3 軸を $[111]$ 軸方向に向けるための座標変換を行い、変換した座標系 (x_1' , x_2' , x_3') における x_1' 軸方向 (第1方向) から応力 p を加えた時の複屈折を求めてみる。この場合のピエゾ光学定数テンソル q'_{ij} は、下記式で表される。

【0050】

【数3】

$$q'_{ij} = \begin{bmatrix} q'_{11} & q'_{12} & q'_{13} & 0 & q_{15} & 0 \\ q'_{12} & q'_{11} & q'_{13} & 0 & -q_{15} & 0 \\ q'_{13} & q'_{13} & q'_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q'_{44} & 0 & 0 \\ q'_{15} & -q'_{15} & 0 & 0 & q'_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q'_{66} \end{bmatrix}$$

【0051】また、NBS TECHNICAL NOTE 993の値から計算した q'_{ij} は表2のようになる。

【0052】

【表2】

表 2 座標変換したピエゾ光学定数

	CaF2	SrF2	BaF2
q'_{11}	0.705	0.705	1.015
q'_{33}	0.357	1.153	1.683
q'_{12}	0.718	1.002	1.402
q'_{13}	0.357	0.553	0.733
q'_{15}	-1.023	-1.268	-1.890
q'_{44}	-0.737	-1.193	-1.723
q'_{66}	-0.0133	-0.297	-0.387
$(q'_{11}-q'_{12})$	-0.0133	-0.297	-0.387

【0053】この値を用いて、一軸応力 σ'_1 を加えたとき($\sigma'_1=p$, $\sigma'_2=\sigma'_3=\dots=0$)の複屈折を計算すると、 $\Delta n//-\Delta n=-(1/2)n^3(q'_{11}-q'_{12})p$ (7) となり、 $q'_{11}-q'_{12}=q'_{66}$ の値がその他の係数と比較して最も小さく、複屈折が最小の値を実現することがわかる。

【0054】即ち、表2の計算値によれば、フッ化カルシウム、フッ化ストロンチウム、フッ化バリウムのいずれにおいても、 $\langle 111 \rangle$ 軸方向の複屈折が最も小さいことがわかる。特に、フッ化カルシウムにかかる $\langle 111 \rangle$ 軸方向の複屈折は非常に小さく、フッ化ストロンチウムやフッ化バリウムより1桁ほど小さくなっている。

【0055】このように、本実施例によれば、光学部材の素材における複屈折の最小方向を選択できた。そして、本実施例によれば、光学部材における複屈折の最小方向を選択して、複屈折の小さい(複屈折が最小となるように光軸方向を設定した)光学素子とするか、或いは前記複屈折の小さい光学素子を光学素子作製用の素材から作製することができた。

【0056】例えば、本実施例では、前記任意の3次元直交座標系においてそれぞれ求めた複屈折の量から前記光学素子用素材について、複屈折が最小となる観察方向(第3方向)を見いだして、複屈折が最小となる観察方向(フッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸方向)が光軸方向と一致(または略一致)するように、前記光学素子用素材を加工することで光学素子を製造した。

【0057】ここで、前記方向が一致(または略一致)するとは、角度のズレでおよそ5度以内を意味する。なお、フッ化カルシウム、フッ化ストロンチウム、フッ化バリウムは全て(111)面で劈開するという性質がある。この劈開面と平行に材料を加工していくことで、複屈折の小さい材料が作れるという点で、加工上も大変有利である。

【0058】また、本実施例では、フッ化カルシウム、フッ化ストロンチウム、フッ化バリウムの各ブロックから $\phi 150 \times 20$ の円盤形状体を切り出して光学素子またはその前駆体(光学素子作製用の素材)とし、 $\phi 150$ の中心軸が[100]、[110]、[111]の三つの場合について、それぞれ複屈折を測定した(表3)。なお、前記ブロックは略同等の結晶成長及び熱処理を経て作製されたものである。

【0059】複屈折は、光学素子またはその前駆体の表面を研磨した後、オーク製作所の自動測定機を用いて有効径 $\phi 140$ を約100点測定した際の最大の複屈折値である。また、()内は平均値である。なお、曲率を有するレンズは、前記前駆体をレンズ形状に加工することにより得られるが、この際、前駆体の $\langle 111 \rangle$ 軸方向がレンズの光軸方向と一致(または略一致)するように加工することは言うまでもない。

【0060】

【表3】

表 3 3種類のフッ化物結晶の複屈折の測定値

軸方位	面方位	CaF2	SrF2	BaF2
[100]	(100)	5.4(3.8)	8.4(5.5)	10.2(5.8)
[110]	(110)	6.8(3.5)	7.3(4.9)	9.1(5.2)
[111]	(111)	1.1(0.4)	2.5(1.0)	2.9(1.3) [nm/cm]

【0061】このように、本実施例によれば、光軸方向がフッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸方向に一致(または略一

致)するか、或いはフッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向に一致(または略一致)する複屈折の小さい

(複屈折が最小となるように光軸方向を設定した) 光学素子を得ることができた。本実施例では、光学部材に付与する一軸応力(テンソル)と任意の3次元座標系におけるピエゾ光学定数(テンソル)を用いて、複屈折の量を任意の3次元直交座標系において求めているが、前記一軸応力に対応する歪み(テンソル)と任意の3次元座標系における弾性光学定数(テンソル)を用いて求めることも可能である。

【0062】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、10 光学素子における複屈折の最小方向を選択できる、光学素子の複屈折算出方法及び複屈折判定方法、複屈折が小さい光学素子、光学装置の収差が小さい光学系、複屈折が小さい光学素子の製造方法を提供できる。

【0063】具体的には、本発明(請求項1~4)によれば、光学素子または光学素子用素材における複屈折の最小方向を選択できる。そして、本発明(請求項1~4)によれば、光学素子または光学素子用素材における複屈折の最小方向を選択して、収差の小さい(最小の)光学系を光学素子により構成するか、或いは複屈折の小さい(複屈折が最小となるように光軸方向を設定した)光学素子を光学素子用素材から得ることができる。20

【0064】また、本発明(請求項5、6)によれば、複屈折の小さい(複屈折が最小となるように光軸方向を設定した)光学素子を得ることができる。本発明にかかる光学素子または光学素子用素材の材料として、光学系の色収差補正を行う上で非常に有効であるフッ化物結晶(単結晶)が好適に使用できる(請求項7)。

【0065】また、本発明にかかるフッ化物結晶(単結晶)としては例えば、フッ化カルシウム、フッ化ストロンチウム、またはフッ化バリウムが好適に使用できる30

(請求項8、13)。光学素子または光学素子用素材の材料がフッ化物結晶(単結晶)である場合には、複屈折が最小となる観察方向(光軸方向)がフッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸方向に一致(または略一致)するか、或いはフッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向に一致(または略一致)することとなる(請求項9)。フッ化物結晶により構成される光学素子であり、光軸方向がフッ化物

結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸方向に一致(または略一致)するか、或いはフッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向に一致(または略一致)する本発明(請求項10)にかかる光学素子は、複屈折の小さい(複屈折が最小となるように光軸方向を設定した)光学素子である。

【0066】また、同一屈折率の或いは異なる屈折率のフッ化物結晶材料を組み合わせる構成される光学装置の光学系であり、該光学系の光軸方向が前記フッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸の方向と一致(または略一致)するか、或いは前記フッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向と一致(または略一致)する光学装置の光学系(請求項11)は、収差の小さい(最小の)光学系である。

【0067】また、フッ化物結晶材料からなり、材料が同一の或いは異なる光学素子を組み合わせる構成される光学装置の光学系の光軸方向が前記フッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸の方向と一致(または略一致)するか、或いは前記フッ化物結晶の $\{111\}$ 面と直交する方向と一致(または略一致)する光学装置の光学系を構成する光学素子(請求項12)は、複屈折の小さい(複屈折が最小となるように光軸方向を設定した)光学素子である。

【0068】本発明によれば、フッ化物結晶の製造方法を変えることなく、材料の方位を指定することで複屈折の小さいレンズを得ることができるので、材料コストをほとんど変えずに、光学系の性能向上が達成できる。また、本発明にかかるテンソルの座標変換を使えば、データブックの値を用いて、最も好ましい材料の使い方が理論的に求まるので、本発明の方法は非常に有効である。

【図面の簡単な説明】

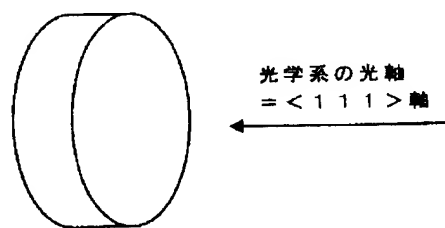
【図1】は、光学系の光軸方向がフッ化物結晶の $\langle 111 \rangle$ 軸の方向と一致(または略一致)することを示す概念図である。

【図2】は、3次元(x_1 : [100]軸、 x_2 : [010]軸、 x_3 : [001]軸)直交座標系における x_3 軸を[111]軸方向に向けたための座標変換の様子を示す概念図である。

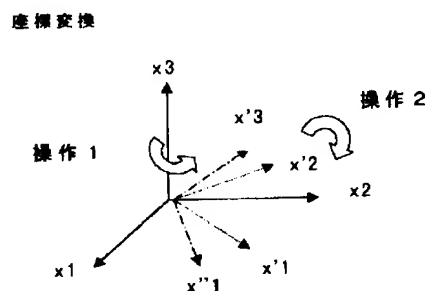
【図3】は、複屈折の大きさを予想するためのアルゴリズムの説明図である。

以上

【図1】

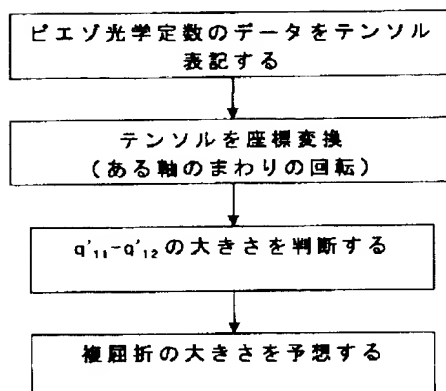


【図2】



【図3】

複屈折の値を予想するアルゴリズム



(12) **United States Patent**
Sakuma et al.

(10) **Patent No.:** **US 6,201,634 B1**
(45) **Date of Patent:** **Mar. 13, 2001**

(54) **OPTICAL ELEMENT MADE FROM FLUORIDE SINGLE CRYSTAL, METHOD FOR MANUFACTURING OPTICAL ELEMENT, METHOD FOR CALCULATING BIREFRINGENCE OF OPTICAL ELEMENT AND METHOD FOR DETERMINING DIRECTION OF MINIMUM BIREFRINGENCE OF OPTICAL ELEMENT**

(75) **Inventors:** **Shigeru Sakuma, Chigasaki; Shuichi Takano, Inagi, both of JP**

(73) **Assignee:** **Nikon Corporation, Tokyo (JP)**

(*) **Notice:** Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 0 days.

(21) **Appl. No.:** **09/265,893**

(22) **Filed:** **Mar. 11, 1999**

(30) **Foreign Application Priority Data**

Mar. 12, 1998 (JP) 10-061794
Apr. 9, 1998 (JP) 10-097973
Oct. 16, 1998 (JP) 10-295554

(51) **Int. Cl.⁷** **G02F 1/00**

(52) **U.S. Cl.** **359/323; 359/256; 359/321**

(56) **Field of Search** **359/322, 323; 359/256, 321**

(56) **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS
4,713,820 * 12/1987 Morris et al. 37/41

OTHER PUBLICATIONS

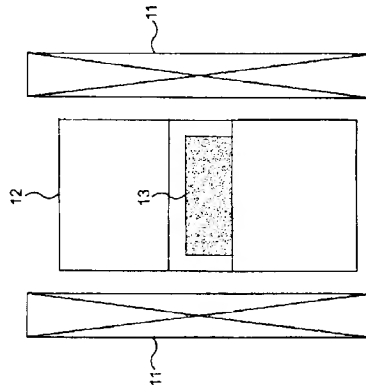
Feldman, Albert et al., "Optical Materials Characterization Final Technical Report," NBS Technical Note 993, Feb. 1, 1978-Sep. 30, 1978, pp. 1-25, 56-63.
* cited by examiner

Primary Examiner—Georgia Epps
Assistant Examiner—Tim Thompson
(74) *Attorney, Agent, or Firm—Morgan, Lewis & Bockius LLP*

(57) **ABSTRACT**

The present invention provides a method for calculating the birefringence of an optical element and selecting the direction of minimum birefringence in the optical element. A material for manufacturing the optical element is a fluoride single crystal with a birefringence value that is reduced compared to conventional materials. The fluoride single crystal is cut from a fluoride single crystal ingot obtained by crystal growth so that the {111} crystal planes are two parallel planes, after which the optical performance is improved by subjecting this material to a heat treatment. The birefringence of the optical element is calculated by converting known piezo-optical constants in a specified three-dimensional orthogonal coordinate system for the optical material into piezo-optical constants in an arbitrary three-dimensional orthogonal coordinate system. The amount of change in the refractive index Δn_1 of the optical material in a first direction along the direction of one coordinate axis of the arbitrary three-dimensional orthogonal coordinate system, and the amount of change in the refractive index Δn_2 of the optical material in a second direction which is perpendicular to the first direction are calculated using a uniaxial stress that is applied to the optical material along the first direction and the piezo-optical constants in the arbitrary three-dimensional coordinate system. The amount of birefringence as seen from a third direction perpendicular to the first direction and the second direction is determined in the arbitrary three-dimensional orthogonal coordinate system by determining the difference between the amount of change in the refractive index Δn_1 and the amount of change in the refractive index Δn_2 .

4 Claims, 4 Drawing Sheets



CLAIMS

What is claimed is:

1. An optical element, wherein:
said optical element is constructed from a fluoride crystal, and the direction of the optical axis of the optical element substantially coincides with the $\langle 111 \rangle$ axial direction of the fluoride crystal, or substantially coincides with a direction perpendicular to the {111} plane of the fluoride crystal.
2. An optical system for an optical apparatus, wherein:
said optical system is constructed by combining a plurality of fluoride crystals having the same refractive index or different refractive indices, and the direction of the optical axis of the optical system substantially coincides with the $\langle 111 \rangle$ axial direction of at least one of the crystals, or substantially coincides with a direction perpendicular to the {111} plane of the at least one fluoride crystal.
3. An optical element used in an optical system for an optical apparatus, wherein said optical element comprises a fluoride crystal, and the direction of the optical axis of the optical system for the optical apparatus substantially coincides with the $\langle 111 \rangle$ axial direction of the fluoride crystal, or substantially coincides with a direction perpendicular to the {111} plane of the fluoride crystal.
4. The optical element according to claim 1, wherein the fluoride crystal is selected from the group consisting of calcium fluoride, strontium fluoride and barium fluoride.